

Bibliography:

1. Development of a computer model of the BOF process / A.S. Sedliar [and others]// Metals and casting Ukraine. – 2007. – № 5. – P. 18-20. (Rus.)
2. Bigeev A.M. The mathematical description of the calculations and steelmaking processes. A manual for schools / A.M. Bigeev. - Moscow, Metallurgy, 1982. – 160 p. (Rus.)
3. Bojchenko B.M. Guidance for calculation of BOF melt for students of all majors / Compiled by: B.M. Bojchenko, S.V. Bochka. - Dnepropetrovsk: NMetAU, 2001. - 25 p. (Rus.)
4. Kharlashin P.S. Guidelines and options to perform tasks of the course work, "Calculation of material and heat balances of the oxygen-converter smelting iron to redistribute the ordinary" on the subject "Theory and technology of steelmaking converters and open-hearth furnaces" (for full-time students specialty 7,090,401 "Metallurgy ferrous metals, "specialty" Metallurgy of steel ") / Compiled by: P.S. Kharlashin, V.Y. Bakst. - Mariupol: PSTU, 2005. – 20 p. (Rus.)
5. Shapovalov A.N. Technology and the calculation of melting steel in oxygen converters: Guidelines for homework and tests for students majoring 150101 / A.N. Shapovalov. - Novotroick: NP MISA, 2011. – 40 p. (Rus.)
6. Dymnich A.H. Guidance for course work "Material and heat balance of converter smelting" (for students majoring 7.090401 MCHM) / Compiled by: A.H. Dymnich, A.D. Riabtsev, A.G. Akinina [and others]. - Donetsk, 2005. - 44 p.
7. Oyks G.N. Production of steel. Calculations / G.N. Oyks, J.M. Joffe, 4th bridles. Ed. G.N. Oyksa. - Moscow, Metallurgy, 1975. - 480 p.

Рецензент: В.А. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.10.2013

УДК 669.184.244.66:669.184.24

© Сущенко А.В.¹, Попов Е.С.², Сидорчук Р.С.³,
Лигус Н.Н.⁴, Орличенко М.П.⁵**МОДЕРНИЗАЦИЯ СОПЛОВОГО БЛОКА КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДУТЬЕВОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ ПРИ
ИЗМЕНЕНИИ ШИХТОВЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ
В ККЦ ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

Разработаны, опробованы и внедрены в производство (в конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь», входящем в ООО «Метинвест холдинг») новые конструкции наконечников кислородных фурм и дутьевые режимы конвертерной плавки, обеспечившие улучшение технико-экономических показателей выплавки стали в изменившихся шихтовых и производственных условиях работы цеха.

Ключевые слова: конвертерная плавка, шихтовые и производственные условия, дутьевой режим, кислородная фурма, сопловой блок, оптимизация параметров, технико-экономические показатели.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь; sushchenko.andrei@gmail.com

² директор по технологии и качеству ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; evgeniy.popov@azovstal.com.ua

³ начальник технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; sidorchuk-rs@azovstal.com.ua

⁴ начальник конвертерного цеха ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; nikolay.ligus@azovstal.com.ua

⁵ начальник сталеплавильного отдела технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь mikhail.orlichenko@azovstal.com.ua

Сущенко А.В., Попов Э.С., Сідорчук Р.С., Лігус М.М., Орліченко М.П. Модернізація соплового блоку кисневої фурми та вдосконалення дутьового режиму плавки при зміні шихтових та виробничих умов в ККЦ ПАТ «МК «Азовсталь». Розроблені, випробовані та запроваджені у виробництво (у конвертерному цеху ПАТ «МК «Азовсталь», що входить у ТОВ «Метінвест холдінг») нові конструкції наконечників кисневих фурм та дутьові режими конвертерної плавки, що забезпечують покращення техніко-економічних показників виплавки сталі в шихтових та виробничих умовах роботи цеха, що змінилися.

Ключові слова: конвертерна плавка, шихтові та виробничі умови, дутьовий режим, киснева фурма, сопловий блок, оптимізація параметрів, техніко-економічні показники.

A.V. Sushchenko, E.S. Popov, R.S. Sidorchuk, M.M. Ligus, M.P. Orlichenko. Oxygen lance nozzle block optimization and converter melt blowing mode improvement with changing the charge and production conditions in oxygen-converter shop of PAS "MK "Azovsteel". New designs of oxygen lance tips and converter melt blowing modes, which provide improvement technical and economical indexes of steelmaking in changed charge and production conditions of workshop, are developed, tested and introduced into production (at oxygen-converter shop of PAS "MK "Azovsteel" in LLC "Metinvest Holding").

Keywords: converter melting, charge and production conditions, blowing mode, oxygen lance, nozzle block, indexes optimization, technical and economical indexes.

Постановка проблемы. В конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь» длительное время в качестве основной применялась кислородная фурма (далее по тексту – базовой конструкции), которая была разработана и внедрена в производство, совместно с ПГТУ, в 1995г. [1, 2] и достаточно успешно использовалась до 2009 г. при выплавке стали, в т.ч. специального назначения [3].

В связи с внедрением технологии азотной раздувки высокомагнезиального шлака на футеровку конвертера и увеличением продолжительности ее кампаний, а также изменением шихтовых и производственных условий работы цеха, к концу 2009/началу 2010 гг., ухудшились процессы шлакообразования, дефосфорации и десульфурации металла в конвертере, увеличилась интенсивность заметалливания оборудования. Поэтому **была поставлена задача** разработки новой конструкции кислородной фурмы, позволяющей улучшить технико-экономические показатели (ТЭП) конвертерных плавов в сложившихся условиях работы цеха. При этом новая фурма должна была также повысить эффективность азотной раздувки модифицированного высокомагнезиального шлака на футеровку агрегата (в ККЦ МК «Азовсталь», как и на большинстве зарубежных предприятий, для продувки плавки кислородом и для раздувки шлака азотом используется одна и та же фурма).

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы совершенствования и оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров, в т.ч. в изменяющихся шихтовых и производственных условиях плавов рассматривались в исследованиях [4-8 и др.] В работе [9] справедливо отмечается, что при использовании технологий конвертирования чугуна с формированием в ходе продувки плавки обогащенного оксидом магния шлака и последующей его азотной раздувки на футеровку конвертера с одной стороны значительно увеличивается стойкость последней, а с другой - существенно ухудшаются сам ход продувки и шлакообразование, а также ряд технико-экономических показателей процесса. Указывается на необходимость совершенствования конструкции головки кислородной фурмы и режимов ее использования. При этом предлагаемые технические решения, в частности, применение двух различных конструкций фурм для продувки плавки кислородом и раздувки шлака азотом, не всегда рационально (с учетом используемых в цехах конструкций машины подачи кислорода).

Изложение основного материала. На основе анализа ТЭП и наблюдений за ходом продувки плавов было установлено, что дутьевой режим процесса с использованием кислородной фурмы базовой конструкции заметно смещен (от оптимального) в сторону «жесткой» продувки. На большом количестве плавов наблюдалось замедленное шлакообразование в начальный период продувки и чрезмерное «свертывание» шлака в период преимущественного обезуглероживания расплава, что сопровождалось интенсивным выносом мелких капель металла, заме-

талливанием стволлов фурм, горловины конвертеров и нижних ступеней ОКГ. В наибольшей степени отмеченная тенденция имела место при работе в заключительный период кампании по футеровке, на плавках с более «горячей» шихтовкой, при пониженном содержании Mn и Si в чугуне, применении БЖР и т. п. В отдельные периоды стойкость кислородных фурм до снятия для очистки от шлако-металлической настыли («до заметалливания») снизилась до 5 - 7 плавов, что затрудняло выполнение производственного плана цехом. При вынужденном «умягчении» продувки в указанных случаях за счет дутьевого режима (снижения расхода кислорода через фурму V_{O_2} и дополнительного увеличения рабочей высоты продувки $H_{ф,р}$) имели место увеличение длительности операции и ухудшение перемешивания нижних объемов металла в ванне, затруднялось управление процессом. В результате был сделан вывод о необходимости «умягчения» сверхзвуковых кислородных струй с дополнительной возможностью увеличения коэффициента «жесткости» дутья ($K_{ж,д}$), в т. ч. для эффективного разбрызгивания шлака азотом на футеровку агрегата.

При создании новой конструкции соплового блока кислородной фурмы использовались теоретические положения и математическая модель макрокинетики кислородно-конвертерной плавки, а также алгоритм оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров [7, 10]. При этом для определения характерных размеров реакционных зон (РЗ) использовали известные полуэмпирические зависимости [11-13], а для оценки параметров зон взаимодействия сверхзвуковых струй азота со шлаковым расплавом при его раздувке на футеровку - полуэмпирические выражения, приведенные в [14]. В результате численного моделирования было получено, что для «умягчения» кислородной продувки плавки при условии сохранения интенсивности (мощности) перемешивания металлической ванны (для устранения нижних плохо перемешиваемых зон в ней) целесообразным является увеличение относительной площади сечения РЗ $\bar{F}_{P_3} = (D_{P_3}/D_6)^2$ на $\approx 5 - 10 \%$ при сохранении относительного заглубления дутьевых струй в расплав $\bar{H}_{P_3} = H_{P_3}/H_6$, на уровне, характерном для базовой фурмы (H_{P_3} , D_{P_3} – глубина и диаметр РЗ; H_6 , D_6 – глубина и диаметр конвертерной ванны в спокойном состоянии). Для этого было предложено использовать в качестве основных продувочных - сверхзвуковые конические сопла Лаваля новой конструкции (с увеличенным углом раскрытия диффузора γ до $30 - 40^\circ$) [2, 15] при одновременном увеличении диаметра минимального сечения сопел (d_{min}) до 47,5 – 48,0 мм. Такие сопла обладают повышенной стойкостью к эрозийному износу. Истекающие из них сверхзвуковые струи имеют увеличенную радиальную составляющую скорости, что позволяет увеличить площадь РЗ и интенсифицировать процесс шлакообразования, а также обеспечить более направленное разбрызгивание шлака на футеровку в процессе его азотной раздувки. При этом расширение диапазона регулирования параметров продувки достигается за счет увеличения d_{min} и наличия определенного «запаса» давления кислорода перед соплами фурмы (на 0,5 - 1 бар). Увеличение, при необходимости, уровня заглубления струй в расплав и интенсивности разбрызгивания шлака на футеровку конвертера достигается увеличением расхода дутья через фурму, а также снижением высоты продувки в пределах оптимальных диапазонов регулирования.

Опытно-промышленные испытания пяти фурменных наконечников новой конструкции были проведены в мае - июне 2010г. на обоих конвертерах (К): на К1 при текущей стойкости футеровки $N_{ф} \approx 2700 - 3900$ плавов и на К2 при $N_{ф} \approx 800 - 1000$ плавов. Средняя стойкость фурм до заматалливания ($Z_{зам}$) составила 86 плавов (средняя по отдельным фурмам: 57, 63, 70, 86 и 156 плавов), что было больше соответствующего показателя для базовых фурм более, чем в 5 раз. Средняя стойкость опытных наконечников до выхода из строя (Z_n) составила 111 плавов (63, 86, 113, 139, 156 плавов), что было в $\sim 1,3$ раза выше средней стойкости базовых фурменных наконечников в указанный период работы цеха. На рис. 1 приведена динамика состояния торцевой части одного из опытных наконечников в процессе эксплуатации. Был отмечен значительно меньший эрозийный износ выходных участков продувочных сопел.

При использовании опытных фурм имело место заметное улучшение процесса шлакообразования в целом, продувка протекала более стабильно и более управляемо, улучшились процессы рафинирования металла в конвертере, существенно снизилась интенсивность заматалливания горловины конвертеров и кессонов ОКГ. Уменьшились простои по замене фурм и обработке горловины агрегатов. Было также установлено, что при реализации технологии раздувки конечного

шлака азотными струями на футеровку опытные фурмы позволяют осуществлять более направленный поток шлака на стены конвертера и заметно уменьшить размер летящих частиц шлака, что способствует образованию на футеровке более равномерного шлакового гарнисажа.

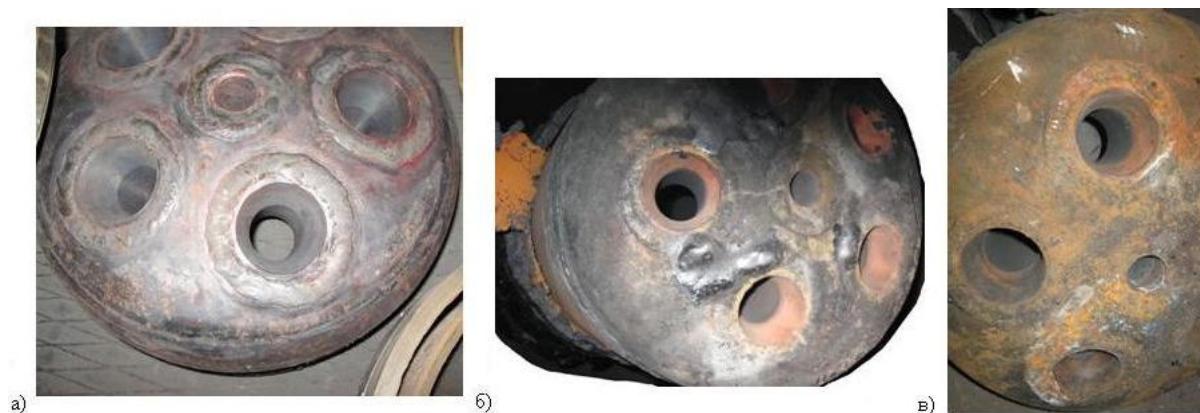


Рис. 1 – Опытный наконечник № 87 в процессе эксплуатации на фурме № 9: а) – до установки на фурменный ствол; б) – после 117-ти плавов и первой очистки от настыли; в) – после снятия головки со ствола фурмы (139 плавов)

Для сравнительной оценки технологических показателей работы фурм с наконечниками новой и базовой конструкций были обработаны данные массивов опытных и сравнительных плавов, проведенных на К1 при его работе во вторую половину кампании по футеровке, т. е. в условиях наименее благоприятных для протекания процесса шлакообразования. При формировании массивов были взяты все плавки указанного периода с однотипной шихтовкой (проведенные без обработки на вакуумматоре), где был выполнен хим. анализ металла и шлака после продувки. Осредненные показатели по массивам опытных (А) и сравнительных (Б) плавов представлены в таблице 1. Приведение показателей указанных массивов плавов к одинаковым шихтовым условиям по тепловому балансу осуществлялось через тепловые эквиваленты, выраженные в удельном расходе жидкого чугуна, по стандартной методике ИЧМ и типовой инструкции Минчермета СССР [12, 16]. Основность шлака ($B_{ш}$) рассчитывалась с учетом содержания в нем MgO и P_2O_5 . Коэффициент дефосфорации металла в конвертере (k_p) определялся с учетом содержания фосфора во всех компонентах металлошихты. При использовании фурменных наконечников новой конструкции имело место: 1) улучшение процесса дефосфорации металла в конвертере; 2) тенденция к повышению содержания C и Mn в металле после продувки при снижении содержания FeO в конечном шлаке; 3) улучшение теплового баланса конвертерных плавов, эквивалентное снижению удельного расхода жидкого чугуна в металлошихте плавки $\Delta m_{ч,экв}$ на 10 – 13 кг/т стали; 4) тенденция сокращения длительности продувки плавки, что связано с увеличением среднего минутного расхода кислорода на продувку. Исследования влияния работы фурм на выход жидкого металла и удельный расход металлошихты (МШ) показали, что при использовании фурм с сопловым блоком новой конструкции удельный расход МШ заданной в конвертер (чугун + лом) меньше на 6,4 и 7,1 кг/т годных слэбов на плавках без и с последующей обработкой металла на вакуумматоре соответственно.

Учитывая полученные положительные результаты испытаний, руководством комбината было принято решение о внедрении фурменных наконечников новой конструкции с середины июня 2010 г.

В 4-ом квартале 2010 г. в ККЦ существенно изменились шихтовые условия плавов, в частности был уменьшен удельный расход жидкого чугуна в МШ $m_{ч,жс}$ до 810 – 840 кг/т стали (на ~ 70 – 90 кг/т стали), что привело соответственно к изменению хода процесса и к необходимости корректировки его температурного, дутьевого и шлакового режимов. Учитывая, что дутьевой режим с использованием фурмы новой конструкции (с соплами Лавалья с $\gamma = 30^\circ$), которая хорошо себя показала при раздувке шлака азотом и продувке плавов с $m_{ч,жс} = 880 – 930$ кг/т стали, не был адапти-

рован к новым условиям, цех был вынужден вернуться к использованию фурмы базовой конструкции. При этом сложившиеся шихтовые и производственные условия работы 350 т конвертеров характеризовались следующими особенностями: увеличенная доля в МШ покупного легковесного лома, скрапа, скрапа зашлакованного, вынужденное применение угля АКО в качестве дополнительного теплоносителя, а также большого количества магнезиальных флюсов с целью обеспечения необходимой стойкости периклазоуглеродистой футеровки конвертеров. В связи с дефицитом приходной части теплового баланса имел место, как правило, «передув» плавов, что сопровождалось снижением выхода жидкого и повышением окисленности металла, перерасходом раскислителей и легирующих, ухудшением условий работы футеровки агрегатов и другого оборудования. Применение больших количеств легковесного лома затрудняет процесс зажигания и приводит к переохлаждению ванны в первом периоде продувки плавки, что, в свою очередь, приводит к повышенному угару металла «в дым» и «в шлак», ухудшению дутьевого и шлакового режимов. Использование загрязненного и негабаритного лома существенно дестабилизирует дутьевой режим, увеличивает количество плавов с выбросами шлако-газо-металлической эмульсии (ШГМЭ) и промежуточным скачиванием шлака. Применение угля также затрудняет процесс продувки плавки, ухудшает шлакообразование, интенсифицирует выносы металла из конвертера, заметалливание стволков фурм и нижней части ОКГ и зарастание горловины конвертера, а также приводит к увеличению содержания серы в металле. Так как в процессе конвертерной плавки углерод угля окисляется преимущественно до СО, то тепловой КПД от его использования остается низким.

Таблица 1

Осредненные показатели по массивам опытных (А) и сравнительных (Б) плавов, проведенных в мае - июне 2010 г. на К1 при $N_{\phi} \approx 2700 - 3900$ плавов

Наименование показателя	Массив А	Массив Б	Разница
Количество плавов, шт	95	88	-
Масса, т/плавку:			
- чугуна жидкого	303,0	305,1	-2,1
- лома	77,2	77,2	0
- в т.ч. скрапа	2,9	4,2	-1,3
- в т.ч. БЖР	1,1	0,9	0,2
- извести вращающ. печей	16,1	16,5	-0,4
- флюса ОДФ	10,6	9,7	0,9
Параметры чугуна:			
- [%Mn]	0,23	0,22	0,01
- [%Si]	0,68	0,61	0,07
- [%S]	0,0227	0,0206	0,0021
- [%P]	0,0635	0,0615	0,0020
- температура, °C	1283,4	1296,3	-12,9
Параметры металла после продувки:			
- [%C]	0,046	0,042	0,004
- [%Mn]	0,068	0,066	0,002
- [%S]	0,0246	0,0244	0,0002
- [%P]	0,0058	0,0062	-0,0004
- температура, °C	1648,4	1639,2	9,2
Параметры шлака после продувки:			
- (%CaO)	45,6	45,0	0,6
- (%MgO)	8,18	7,81	0,37
- (%FeO)	13,8	15,0	-1,2
- (%SiO ₂)	14,29	13,95	0,34
- (%P ₂ O ₅)	1,01	1,00	0,01
- основность, ед.	3,53	3,53	0
Коэффициент дефосфорации k_p , %	90,1	87,7	2,4

С целью улучшения ТЭП конвертерных плавов в сложившихся условиях, с использованием указанной выше методики, был модернизирован сопловой блок кислородной фурмы: (5п + 1ц) - пять основных конических сопел Лаваля с двухчастковым диффузором [2], с увеличенным d_{min} (до 48 мм) и соответственно уменьшенным значением числа Маха ($Mc = 2,17$), при неизменном угле их наклона к оси фурмы ($\alpha = 15^\circ$), и центральным соплом с меньшей пропускной способностью ($d_{min} = 30$ мм; $Mc = 1,5$). При расчете конструктивных и режимных параметров наконечника, с целью расширения диапазона эффективной работы фурмы в нестабильных шихтовых условиях плавов, предусматривалась возможность дополнительного регулирования параметра $K_{ж,д}$ за счет создания определенного «запаса» P_{O_2} перед соплами. Основная задача - стабилизировать дутьевой режим плавки и улучшить процесс шлакообразования в конвертере. При этом улучшение теплового баланса плавки и снижение удельного расхода МШ предполагалось достигнуть за счет: снижения потерь теплоты и железа с выносами металла и выбросами ШГМЭ из конвертера, снижения потерь теплоты от зеркала металла и увеличения степени дожига СО до СО₂ при стабилизации процесса шлакообразования.

Опытно-промышленные испытания пяти фурменных наконечников модернизированной конструкции были проведены на К1 и К2 в марте – апреле 2011 г. Работа фурм с опытными наконечниками характеризовалась (по сравнению с фурмой базовой конструкции) более стабильным дутьевым режимом и характером протекания процесса обезуглероживания расплава (газо-выделения), а также меньшей интенсивностью брызгообразования. При этом, как и ожидалось, имело место «умягчение» продувки и улучшение процесса шлакообразования, что проявилось, в том числе, в увеличении параметра $Z_{зам}$ (более, чем в 2 раза), а также снижении интенсивности зарастания горловины конвертера и нижней части ОКГ. При необходимости, повышение степени «жесткости» дутья достигалось увеличением рабочего расхода кислорода на 20 – 50 м³/мин. Это также способствовало сокращению длительности продувки плавов. Отмечалось также улучшение управляемости процессом продувки плавки за счет регулирования V_{O_2} и $H_{ф,р}$. Было установлено, что, при имеющемся в цехе давлении кислорода, фурма надежно работает в диапазоне расходов кислорода (в т.ч. основного рабочего) 800-1300 (1100-1200) м³/мин и позволяет увеличивать V_{O_2} в начале продувки для улучшения «зажигания» плавки, при необходимости, до 1500 м³/мин.

С целью сравнения ТЭП работы фурм при различном состоянии футеровки конвертеров были обработаны данные двух пар массивов плавов: массивы № 1 и № 2 (№ 3 и № 4) – соответственно опытные и базовые фурмы, К1 (К2), при $N_{ф} \geq 1000$ ($N_{ф} \geq 2500$ плавов) – 1-ая (2-ая) половина кампании по футеровке – таблица 2. При формировании массивов плавов были взяты подряд все однотипные по шихтовке плавки, проведенные в указанный период без вакууммирования с последующей разливкой на МНЛЗ. Приведение их показателей к одинаковым шихтовым условиям по тепловому балансу осуществлялось по указанной выше методике. При этом удельный расход МШ: жидкий чугун + металлоохладители - МО (лом и его заменители), кг/т жидкой стали (до присадки ферросплавов в ковш), определялся с учетом замусоренности различных компонентов МШ неметаллическими материалами.

При использовании кислородных фурм с наконечниками модернизированной конструкции имело место снижение удельного расхода МШ (на 1,5 – 5,7 кг/т стали), что связано с улучшением процесса шлакообразования и снижением интенсивности брызгообразования при продувке, а также с уменьшением угара металла «в дым» за счет улучшения теплового баланса плавки, эквивалентное снижению удельного расхода жидкого чугуна в МШ на величину $\Delta m_{ч,эжв} = 6 - 10$ кг/т стали. Последнее объясняется уменьшением тепловых потерь: от металлической ванны (за счет формирования над ней более стабильного шлакового покрова), с выносами металла и выбросами ШГМЭ из конвертера, а также увеличением степени дожига СО до СО₂ в шлаке и над ванной при более «мягкой» продувке. При использовании опытных фурм содержание FeO в конечном шлаке было стабильно ниже во всем диапазоне значений содержания углерода в металле после продувки - см. рис. 2. При этом (для массивов плавов 1 и 2) параметр k_p увеличился на ~ 1 % при одинаковом значении $B_{ш}$.

Следует также отметить, что в связи с переходом на новые шихтовые и производственные условия работы конвертеров и ухудшением дутьевого и шлакового режимов плавов, среднемесячная стойкость медных фурменных наконечников в цехе к концу 2010 г./началу 2011 г.

снизилась с обычного уровня 90 – 150 плавов до ~ 70 плавов. Приблизительно в таком же отношении уменьшился и показатель $Z_{зам}$. Средняя стойкость пяти наконечников модернизированной конструкции составила 139 плавов (диапазон: 74 – 329 плавов), что в ~ 2 раза выше величины Z_n для базовых фурм в период испытаний (71 плавка) – см. рис. 3. Величина $Z_{зам}$ для опытных фурм составила 45 плавов, что было в ~ 2,5 раза выше аналогичного показателя для базовых фурм.

Таблица 2

Осредненные показатели массивов опытных (массивы 1, 3)
и сравнительных (массивы 2, 4) плавов

Наименование показателя		Массив 1	Массив 2	Разница (1-2)	Массив 3	Массив 4	Разница (3-4)
Количество плавов		103	91	-	154	162	-
Масса МО, т	МО итого, в т.ч.:	98,49	97,15	1,34	98,41	97,04	1,37
	Лом покупн.	90,08	93,26	-3,18	93,23	93,36	-0,13
	Лом чугуна	0,95	0,00	0,95	0,513	0,00	0,51
	Скrap зашл.	3,84	1,61	2,23	3,27	2,30	0,97
	БЖР	2,13	1,83	0,30	0,31	1,38	-1,07
Масса сыпуч. материалов, т	Известь	14,60	14,48	0,12	13,86	14,59	-0,73
	Флюс ОДФ	4,63	3,57	1,06	5,71	5,50	0,21
	Флюс Р-71	0,84	0,50	0,35	3,77	3,02	0,75
	Флюс Р-55	0,37	0,06	0,31	0,0	0,0	0,0
	БДУ-у	0,43	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
	Уголь	2,03	0,45	1,58	2,71	3,56	-0,85
Параметры жидк. чугуна	Масса, т	278,68	277,23	1,45	278,73	278,12	0,61
	Si, %	0,623	0,655	-0,033	0,636	0,632	0,004
	Mn, %	0,264	0,232	0,032	0,267	0,244	0,024
	S, %	0,019	0,022	-0,003	0,022	0,021	0,001
	P, %	0,053	0,053	0,0	0,052	0,052	0,0
	T, °C	1315,9	1314,8	1,1	1312,1	1317,1	-4,9
Металл после пр	T, °C	1631,1	1628,7	2,4	1629,4	1628,0	1,4
	C, %	0,040	0,040	0,00	0,041	0,041	0,00
	Mn, %	0,068	0,060	0,008	0,066	0,072	-0,014
	P, %	0,0066	0,0072	-0,0006	0,0064	0,0065	-0,0001
Шлак после прод.	SiO ₂ , %	14,07	13,76	0,31	14,17	13,87	0,29
	CaO, %	37,24	37,29	-0,05	34,13	35,76	-1,64
	MgO, %	9,49	8,47	1,02	10,20	10,01	0,18
	Основность	3,2	3,2	0	3,0	3,1	-0,1
	FeO, %	16,19	17,32	-1,13	16,76	17,01	-0,24
Удельный расход МШ, кг/т ж. стали		1121,53	1127,20	-5,67	1125,2	1126,7	-1,47
Коэффициент дефосфорации k_p , %		87,6	86,4	1,2	88,3	88,2	0,1
$m_{ч, экв}$, кг/т ж. стали		820,18	826,15	-5,97	815,92	826,37	-10,44

В указанный период работы цеха было выполнено опробование двух фурменных наконечников (5п + 1ц) с основными соплами Лаваля с $\gamma = 30^\circ$ ($d_{\min} = 48$ мм; $M_c = 2,22$) с адаптацией режима продувки плавки к новым шихтовым условиям. Получено, что этот вариант фурмы (по сравнению с базовым) также имеет ряд преимуществ: улучшение теплового баланса плавки ($\Delta m_{ч, экв} = 5,5$ кг/т); снижение удельного расхода МШ (на 3,0 кг/т) и существенное улучшение дефосфорации металла в конвертере (параметр k_p увеличился на 4,8 % и достиг 91,4 %). Однако, при работе указанных фурм в ряде случаев отмечалось чрезмерное «умягчение» продувки плавов

и имело место увеличение $(\text{FeO})_{\text{ш}}$ на $\sim 2,5\%$. При ограниченной пропускной способности газоотводящего тракта К1 (1-ая половина кампании по футеровке) и невозможности стабильного увеличения V_{O_2} на $100 \text{ м}^3/\text{мин}$ рабочая высота продувки была вынуждено уменьшена на $\sim 300 \text{ мм}$, что привело к существенному снижению стойкости фурменных наконечников.

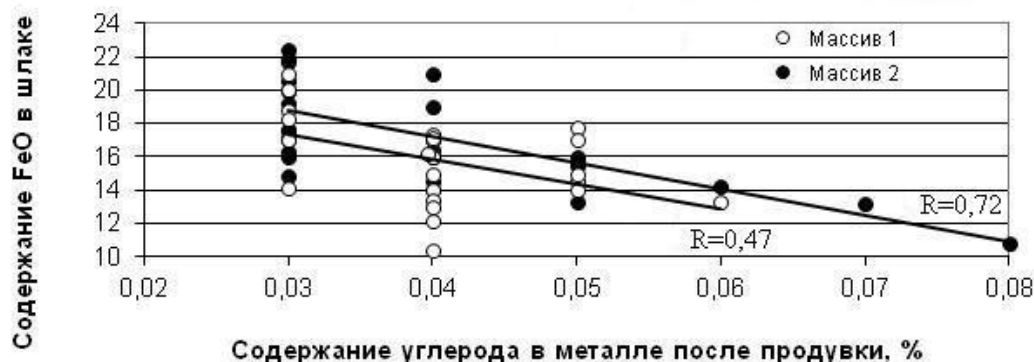


Рис. 2 – Зависимость $(\text{FeO})_{\text{ш}}$ от содержания углерода в металле после продувки на опытных и сравнительных плавках (из массивов 1 и 2) при близких параметрах жидкого чугуна (T , Si , Mn)



Рис. 3 – Наконечник кислородной фурмы модернизированной конструкции в период испытаний: а) – после установки на фурменный ствол; б) – снятый с фурмы после 329 плавов

В период май - июнь 2011 г. в цехе проводились также опытно - промышленные испытания наконечников кислородных фурм производства фирмы «Saar Metall» (Германия), ковано-паяной конструкции, имеющих шесть сопел Лавала. Средние значения параметров Z_n и $Z_{\text{зам}}$ для них составили соответственно 86 и 17 плавов, что было существенно меньше, чем для фурмы модернизированной конструкции (см. выше). Указанные наконечники обеспечивали «умягченную» продувку плавки, близкую по параметрам к продувке через фурму с пятью основными соплами с $\gamma = 30^\circ$; при их использовании имело место усложнение управления процессом ведения плавки, особенно в первый период кампании по футеровке конвертера (при максимальном значении H_6 и минимальном D_6), а также при ограниченном расходе кислорода через фурму.

На основе сравнительного анализа результатов работы фурм указанных выше конструкций было принято решение о целесообразности использования фурм с головками модернизированной конструкции собственного изготовления. Их внедрение в производство с окончательной отработкой режима продувки конвертерной плавки было осуществлено в июле 2011 г.

На рис. 4, 5 представлена динамика изменения показателей Z_n и $Z_{\text{зам}}$ в цехе в 2011 г. После широкомасштабного внедрения фурм модернизированной конструкции имеет место четко выраженная тенденция увеличения указанных показателей, подтверждающих улучшение дуть-

евого и шлакового режимов плавки. Также было отмечено стабильное снижение интенсивности настylieобразования на горловине конвертера и нижней части ОКГ.

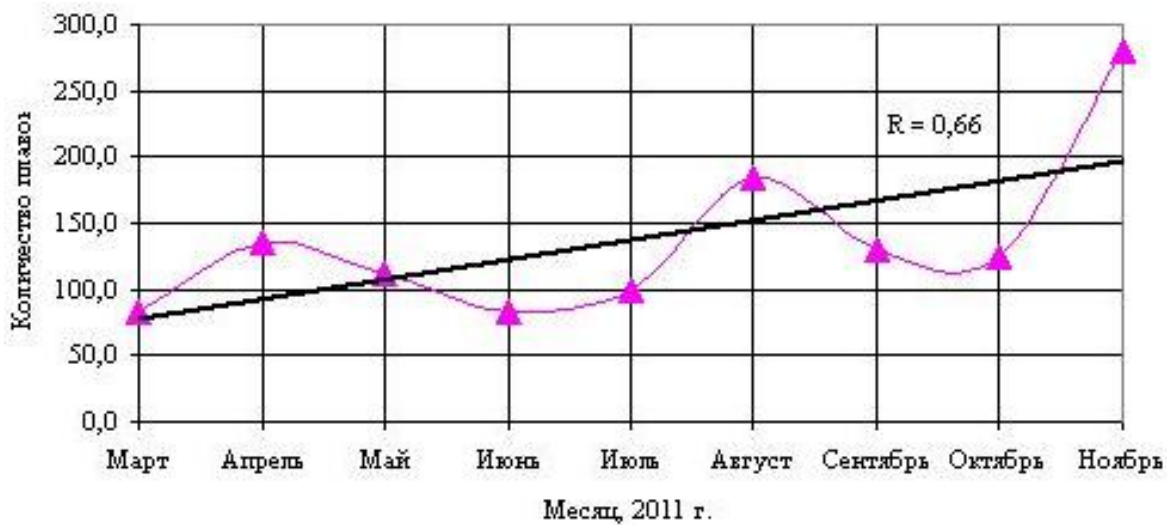


Рис. 4 – Динамика изменения среднемесячной стойкости наконечников кислородных фурм в ККЦ ПАО «МК «Азовсталь» в 2011 г.

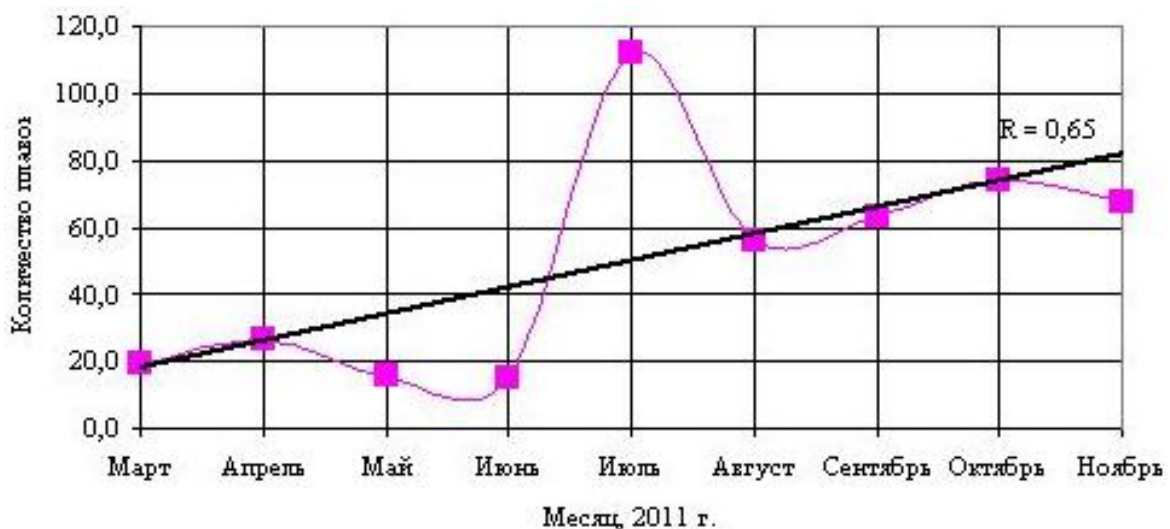


Рис. 5 - Динамика изменения среднемесячной стойкости кислородных фурм «до заметаливания» (конвертер № 2) в 2011 г.

Выводы:

1. Использование кислородной фурмы новой конструкции в условиях работы ККЦ ПАО «МК «Азовсталь» 2010 г. ($m_{ч.жс} = 880 - 930$ кг/т стали, наведение высокомагнезимального шлака и применение технологии его азотной раздувки на футеровку конвертера) позволило: стабилизировать дутьевой режим, улучшить процессы шлакообразования и рафинирования металла в конвертере, а также тепловой баланс плавки (эквивалентно снижению удельного расхода жидкого чугуна в металлошихте $\Delta m_{ч.жс}$ на 10 – 13 кг/т стали), существенно снизить интенсивность заметаливания оборудования, сократить удельный расход металлошихты (чугун + лом) на 6,4 - 7,1 кг/т годных слябов, увеличить стойкость медных наконечников и фурм до снятия для очистки от шлако-металлической настыли в 1,3 и 5 раз соответственно.
2. Применение кислородной фурмы модернизированной конструкции в условиях работы цеха 2011 г. ($m_{ч.жс} = 810 - 840$ кг/т стали, использование в больших количествах легковесного

лома и скрапа зашлакованного, а также дополнительного теплоносителя - угля АКО) позволило: улучшить дутьевой и шлаковый режимы, а также тепловой баланс ($\Delta m_{ч,экв} = 6 - 10$ кг/т стали) плавки, уменьшить угар металла в шлак и «в дым», сократить удельный расход металлошихты на 1,5 – 5,7 кг/т стали, увеличить стойкость наконечников и фурм «до заматливания» в 2 и 2,5 раза соответственно.

3. Задачами дальнейших исследований являются: разработка (на базе соплового блока модернизированной конструкции), опробование и внедрение фурмы новой конструкции, обеспечивающей дополнительное улучшение теплового баланса плавки за счет интенсификации дожигания отходящих газов в полости конвертера, а также разработка и реализация концепции использования парка кислородных фурм для эффективной работы цеха в изменяющихся шихтовых и производственных условиях.

В работе принимали участие: Гриценко А.С., Трусов А.В., Кученев А.А., Котельников Л.А., Кучерявенко А.С., Кузнецов Р.В., Конашевич А.А.

Список використаних джерел:

1. Сущенко А.В. Оптимизация параметров соплового блока кислородной фурмы в ККЦ АП «МК «Азовсталь» / А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др. // Труды IV конгресса сталеплавателей. – М.: АО «Черметинформаци». – 1997. – С. 113-114.
2. Сущенко А.В. Повышение стойкости наконечников фурм для 350-т конвертеров / А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др. // Сталь. – 1996. – № 5. – С. 14-17.
3. Носоченко О.В. Разработка и освоение технологии производства стали с содержанием серы не более 15 ppm в ККЦ ОАО «МК «Азовсталь» / О.В. Носоченко, В.И. Ганошенко, И.Л. Бузун и др. // Металл и литье Украины. – 2003. – № 7 – 8. – С. 20-22.
4. Каплун П.Р. Некоторые вопросы оптимизации дутьевого режима конвертерного процесса / П.Р. Каплун, И.И. Борнацкий // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1979. – № 8. – С. 33-36.
5. Айзатулов Р.С. Кислородная фурма для продувки конвертерной ванны при изменяющихся параметрах металлозавалки / Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, Г.С. Гальперин и др. // Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 1995. – № 4. – С. 11-13.
6. Величко А.Г. Вариативные конструкции кислородных фурм для конвертерного цеха ОАО «АрселорМитал Кривой Рог» / А.Г. Величко, Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев и др. // ОАО «Черметинформация, Бюллетень «Черная металлургия». – 2008. – № 12. – С. 27-29.
7. Сущенко А.В. К вопросу оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – №3. – С.21-26.
8. Величко А.Г. Рациональные конструкции многосопловых наконечников для кислородно-конвертерных фурм / А.Г. Величко, А.Г. Чернятевич, И.В. Чернятевич и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 7. – С. 49-52.
9. Чернятевич И.В. Современное состояние и направления совершенствования конструкций кислородных фурм для продувки конвертерной ванны / И.В. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич // Бюл. Черная металлургия. – 2008. – № 12. – С. 23-27.
10. Капустин Е.А. Развитие теории и математической модели кислородно-конвертерной плавки / Е.А. Капустин, А.В. Сущенко // В кн.: Вопросы теории и практики сталеплавленного производства. – М.: Металлургия, 1991. – С.57-73.
11. Колпаков С.В. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоткий и др. - М.: Машиностроение, 1987. - 184 с.
12. Чернятевич А.Г. Разработка энергосберегающих методов продувки конвертерной ванны на основе высокотемпературного моделирования: Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.16.02 / ДПИ. - Донецк, 1990. – 34 с.
13. Протопопов Е.В. Разработка теории и комплексной технологии конвертерной плавки при изменяющихся параметрах металлозавалки: Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.16.02 / СГИУ. - Новокузнецк, 1999. – 49 с.
14. Чубина Е.А. Совершенствование технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера и конструкций гарнисажных фурм. Дис. на соискание ученой степени к. т. н. по спец. 05.16.02. Днепропетровский гос. техн. ун-т, 2009. - 238 с.
15. Сущенко А.В. Сопла кислородно-конвертерных фурм с повышенной стойкостью против

ерозийного износа / А.В. Сущенко, Ф.И. Лухтура, А.Б. Ковура и др. // Сталь. – 2005. – № 9. – С. 20-25.

16. Старов Р.В. Производство стали в конвертерах / Р.В. Старов, В.А. Нагорских. - Киев: Техника, 1987. – 165 с.

Bibliography:

1. Sushchenko A.V. Oxygen lance nozzle block parameters optimization in oxygen-converter shop AP “МК “Azovsteel” / A.V. Sushchenko, A.A. Kurdykov I.D. Buga and others // Trudi IV kongressa staleplavilshikov. – M.: AO “Chermetinformacia”. – 1997. – P. 113-114. (Rus.)
2. Sushchenko A.V. Increasing resistance lance tips of 350-t converters / A.V. Sushchenko, A.A. Kurdykov, I.D. Buga and others // Stal. – 1996. - № 5. – P. 14-17. (Rus.)
3. Nosochenko O.V. Development and finalization technology producing steel which consist sulfur less then 15 ppm in oxygen-converter shop OAO “МК “Azovsteel” / O.V. Nosochenko, V.I. Ganochenko, I.L. Buzun and others // Metall i Litie Ukraini. – 2003. - № 7 – 8. – P. 20-22. (Rus.)
4. Kaplun P.R. Some questions about optimization blowing mode in converter process // Izv. VUZov/ Chernaya metallurgia. – 1979. - № 8. – P. 33-36. (Rus.)
5. Aizatulov R.S. Oxygen lance for converter bath blowing with changing charge parameters / R.S. Aizatulov, E.V. Protopopov, G.S. Galperin and others // Byl. NTI “Chernaya metallurgia”. – 1995. - № 4. – P. 11-13. (Rus.)
6. Velichko A.G. Variable oxygen lance designs for OAO “ArselorMital Krivoi Rog” converter shop / A.G. Velichko, B.M. Boichenko, K.G. Nizyev and others // OAO “Chermetinformacia, Bylleten “Chernaya metallurgia”. – 2008. - № 12. – P. 27-29. (Rus.)
7. Sushchenko A.V. To the oxygen converters blowing modes and devices optimization / A.V. Sushchenko // Izv. Vuzov. Chernaya Metallurgia. – 2002. – №3. – P. 21-26. (Rus.)
8. Velichko A.G. Oxygen lance multi nozzle tips rational designs / A.G. Velichko, A.G. Chernyatevich, I.V Chernyatevich and others // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost. – 2012. - № 7. – P. 49-52. (Rus.)
9. Chernyatevich I.V. Current state and ways of improving oxygen lances for converter bath blowing design / I.V. Chernyatevich, E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich // Byl. Chernaya metallurgia. – 2008. – № 12. – С. 23-27. (Rus.)
10. Kapustin E.A. Development of the oxygen melting theory and mathematic model / E.A. Kapustin, A.V. Sushchenko // in book: Voprosi teorii i praktiki staleplavilnogo proizvodstva. M.: Metallurgia, 1991. – P. 57-73. (Rus.)
11. Kolpakov S.V. Steelmaking technology in modern converter shops / S.V. Kolpakov, R.V. Starov, V.V. Smoktiy and others. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 184 p. (Rus.)
12. Chernyatevich A.G. Development energy saving methods converter bath blowing based on high temperature modeling: Avtoref. Dis. Doct. Techn. Nauk: 05.16.02 / DPI. – Donetsk, 1990. – 34 p. (Rus.)
13. Protopopov E.V. Development theory and complex technology converter melting in various metal charge options: Avtoref. Dis. Doct. Techn. Nauk: 05.16.02 / SGIU. – Novokuzneck, 1999. – 49 p. (Rus.)
14. Chubina E.A. Development slag skull applying on converter lining technology and skull lances designs. Dis. Kand. Techn. Nauk: 05.16.02 / Dniprodzerjinskiy Gos. Techn. Un-t, 2009. – 238 p. (Rus.)
15. Sushchenko A.V. Oxygen converter lance nozzles with increased erosion resistance / A.V. Sushchenko, F.I. Lukhtura, A.B. Kovura and others // Stal. – 2005. – № 9. – P. 20-25. (Rus.)
16. Starov R.V. Converter steelmaking / R.V. Starov, V.A. Nagorskyh. – Kiev: Tehcnika, 1987. – 165 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.10.2013